致密射电源0223+341和0248+430的毫角秒尺度偏振研究*

李宇航[1]，张海燕[2, 3]，陈如荣[2, 3]
（1 西藏大学理学院，拉萨 850000）
（2 中国科学院国家天文台，北京 100101）
（3 中国科学院FAST重点实验室，北京 100101）

摘要：利用美国甚长基线干涉阵，对致密射电源0223+341和0248+430进行了4.6GHz的偏振观测，获得了角分辨率高达2毫角秒的辐射强度分布图像，并首次得到了这两个射电源在4.6GHz频率的偏振矢量分布结果。其中致密陡谱源0223+341未观测到射电核，射电结构主要由两个疑似热斑的成份组成，偏振辐射集中在其中一个热斑处，而偏振度较低，周围可能有较浓密的介质；而吉赫兹反转谱源0248+430呈现单侧核—喷流结构，偏振辐射集中在射电核附近。

关键词： 偏振观测；致密射电源；偏振结构
中图分类号：P161.3

1

0 引 言

致密陡谱 (Compact Steep Spectrum，CSS) 源和吉赫兹峰谱 (Gigahertz Peaked Spectrum, GPS) 源是光学薄区域的谱指数$\alpha \geqslant 0.5$($S \propto \nu^{-\alpha}$)的致密射电源，分别约占河外射电源数目的30%和10%。其中CSS源的线尺度为1-20kpc，而GPS源一般小于1kpc。由于同步自吸收或自由自由吸收效应，它们的射电频谱会出现低频反转，并导致峰形结构，其中CSS源的峰值频率一般位于500MHz以下，而GPS源的峰值频率位于500MHz和10GHz之间[1]。关于CSS和GPS源，目前有三个主流的假说：（1）GPS源是比较年轻的射电源，其处于演化的早期，未来会演化成CSS源。（2）GPS和CSS源与周围稠密的介质有较强烈的相互作用，从而限制了它们的尺度。（3）GPS源可能是暂现源或间歇源。因此，对CSS源和GPS源射电结构和辐射情况的研究，可以促进对它们的形态结构、演化和周围物理环境的认识[2-3]。此外，由于它们与周围星系介质有较强的相互作用，偏振观测可以观测源的偏振情况和反推磁场结构，更加深入地了解源喷流和介质的相互作用[2-4]。

我们从Fomalont等[5]在1996年开展的美国甚长基线干涉阵(Very Long Baseline Array, VLBA) 5GHz观测项目中选取了射电源0223+341和0248+430进行研究，它们的光学类型和红移见表1。源0223+341射电谱的反转频率ν_m为250MHz，反转部分（$\nu > \nu_m$）的谱指数约为0.6，且射电结构整体尺度达8kpc[1]，属于CSS源。1.66GHz频段的甚长基线干涉仪（Very long baseline interferometry，VLBI）观测显示该源有kpc尺度的结构，其中有一个明亮的大尺度结构，并在西南方向上相距约500mas处有一个更大尺度的射电瓣，其上有微弱的射电节点[6]。5GHz频段的VLBA观测显示其东北部明亮的结构主要由两个比较扭曲的结构组成，未观测到射电核[5, 7]。8GHz、15GHz和23GHz频段的VLBA和甚大阵（Very Large Array，VLA）观测显示射电核靠近西南部分，射电瓣朝西南方向延伸，有一定的偏振辐射[8]，而东北部明亮的结构进一步分解为两个热斑[9]。源0248+430射电谱的反转频率为5GHz，反转部分（$\nu > \nu_m$）的谱指数约为0.8，且射电结构整体尺寸为0.47kpc[1]，属于GPS源。1.66GHz和5GHz频段的VLBA观测显示其呈现单侧核—喷流结构，喷流向东南方延伸，结构较扭曲，有明显的节点，核射电辐射占主导[5,10]。15GHz频段的VLBA观测显示大尺度的喷流结构被分解为小尺度精细结构，喷流方向上仍有较明亮的节点[11]。5GHz和15GHz频段的VLA偏振观测，得到该源在这两个频段上的偏振度均约为1%[12]。这两个源毫角秒尺度有明显的喷流，形态结构比较扭曲，推测它们与周围的介质有较为强烈的相互作用，便于研究源与周围环境的相互作用。美国国家射电天文台1.4GHz频段的VLA巡天项目（NVSS）观测到这两个源有一定的偏振辐射[13]。目前针对这两个源的5GHz频段偏振观测不

*基金项目：国家自然科学基金项目(U1831128、12041301)资助.
作者简介：李宇航，男，硕士，研究方向：致密陡谱源的VLBI观测研究。 Email: lyh@nao.cas.cn

是很多，通过VLBA 5GHz的偏振观测，我们可以得到它们毫角秒(milliarcsecond, mas)尺度的射电辐射强度图和偏振图，进而研究它们的射电结构、偏振情况和磁场结构，并分析喷流与介质的相互作用。本文采用的哈勃常数H_0=71Kms^{-1}Mpc^{-1}，物质密度参数Ω_m=0.27，暗能量密度参数Ω_Λ=0. 73。

1 观测与数据处理

2004年2月25日，我们利用VLBA的10面天线对射电源0223+341和0248+430进行观测，观测代码为BZ031。两个源分别进行了3次观测，每次时长7-8min，采用双偏振模式，观测频率为5GHz，分为4个中频，每个中频有16个通道，通道带宽为8MHz，1bit量化。观测数据由位于美国索科里（Socorro）的FX架构相关处理器进行相关，输出UVFITS数据用于后续处理[14]。

参照AIPS(Astronomical Image Processing System)软件包的使用说明[15]，利用AIPS对观测数据进行了处理，首先进行数据编辑、幅度预校准、视差角校准、带通校准、仪器相位校准和条纹拟合等步骤，然后将数据进行平均，再应用校准和编辑数据，然后自校准和成图。之后利用源DA193进行设备偏振(D-term)改正，并利用源1308+326进行绝对偏振位置角改正(引用VLBA/VLA偏振角校准网站：http://www.aoc.nrao.edu/~smyers/calibration/)，获得偏振分布图。

2 结果和分析

通过数据处理，得到了两个目标源在4.6Hz频率的总流量和偏振观测结果，见表1。其中表1第1列为源名称；第2列为光学类型；第3列为赤经；第4列为赤纬；第5列为红移；第6列为总流量；第7列为偏振流量；第8列为偏振度。

表 1　4.6GHz 频率的 VLBA 观测结果

Table 1　Results of the VLBA observation in 4.6GHz

Source (1)	Opt. ID (2)	RA (J2000) (3)	DEC (J2000) (4)	*z* (5)	*I* /Jy (6)	*P* /mJy (7)	m (8)
0223+341	Quasars*	02 26 10.3	+34 21 30.3	2.91*	1.52	17.99	1.18%
0248+430	Quasars*	02 51 34.5	+43 15 15.8	1.31*	1.12	43.34	3.87%

* Obtained from reference [5]

使用AIPS的JMFIT命令对两个目标源进行高斯拟合，得到了模型拟合结果，见表2。其中第1列为源名称；第2列为源成份；第3、4列分别为源成份的半长轴和半短轴；第5列为长轴的方向角；第5列为总流量。

表 2　模型拟合结果

Table 2　Results of model fitting

Source (1)	Comp (2)	*a* /mas (3)	*b* /mas (4)	*Pa* (5)	*I* /mJy (6)
0223+341	E1	4.1	2.4	170.2°	1218.9
	E2	3.6	2.1	161.0°	165.1
0248+430	A	3.9	2.4	166.7°	122.1
	B	5.5	2.3	150.7°	97.4
	C	4.3	2.6	159.0°	900.5

2.1 0223+341

图1(a)和(b)分别展示的是叠加在辐射强度图上的偏振流量灰度分布图和偏振矢量分布图（1mas=7.898pc）。流量结构主要由分别位于东部和北部的E1和E2这两个强辐射的部分组成，辐射流量分别占总流量的79.6%和10.9%。在西南方向观测到一些射电斑点，推测射电结构向西南方向延伸，符合已有的观测结果[5, 7]，该源的射电结构比较稳定。其中Fomalont等[5]1996年的VLBA的观测获得的总流量为1.7Jy，Dallacasa等[7]1991年的VLBA观测得到的总流量为1.5Jy，而

本次观测得到1.52Jy，变化不大，他们利用5GHz和1.7GHz的观测数据得到了E1和E2的谱指数，分别为-0.3和0，并根据谱指数和扭曲的结构推测E1和E2为热斑。而在Patnaik等[9]15GHz的VLBA观测得到的14mas^{2}范围内的结构中只保留了E1和E2，其余部分被分解了，可见射电核并不在展示的结构中。Mantovani等[8]23GHz频段的观测显示核心位于该结构的西南方向约400mas（3.16kpc）处，不在图1展示的范围内。

Dallacasa等[7]1991年VLA的偏振观测没有得到明显的偏振结构，偏振度小于0.6%。而本研究首次得到了源0223+341在4.6GHz频率的毫角秒尺度偏振结构。图1(a)显示该源偏振流量集中在E1东北部，峰值亮度为5.65mJy/beam（对应13σ，rms=0.43mJy/beam），而图1(b)显示其有一定的偏振结构，偏振矢量1mas = 3.125mJy/beam。偏振方向为东北—西南方向，且无明显变化，并由E1部分向E2部分延伸，偏振度约为1%，比较低，可能是有限的分辨率或周围介质的影响，导致消偏振效应。利用IVS观测数据库[16]，参考该源1996年2.3GHz和8.3GHz的VLBA观测图像计算了谱指数分布，偏振区域的谱指数分布在-0.6—0.02范围内，比较符合Dallacasa等人[7]的结果。E1大部分区域和E2未观测到明显的偏振辐射，推测它们周围有较浓密的介质，产生较强的消偏振效应，有限的分辨率也是可能的原因。

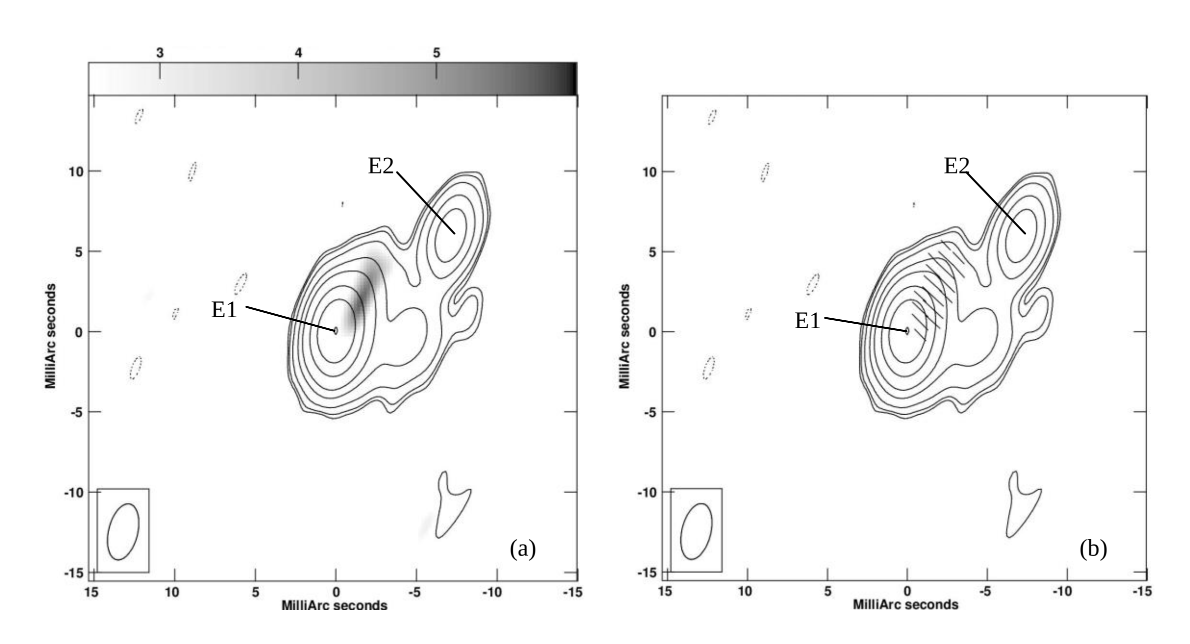


图 1 0223+341 (a)：叠加在辐射强度图上的的偏振流量灰度分布图。波束为 3.3×1.8mas^2，位置角为-12.92 °；辐射强度图峰值流量为 0.797Jy/beam，等强度线依次为峰值流量的-0.5%、0.7%、1%、2%、5%、10%、25%、50%和 99%。灰度色标单位为 mJy/beam。(b)：叠加在辐射强度图上的偏振矢量分布图。参数与图(a)相同。

Fig.1 0223+341 (a) Distribution of polarization flux density superposed on the contour images of the total intensity. The restoring beam is 3.3×1.8mas^2 in p.a. -12.92 °; the peak flux density is 0.797Jy/beam, contours are plotted at -0.5%、0.7%、1%、2%、5%、10%、25%、50%和 99% of the peak flux density. The unit of grey scale is mJy/beam. (b) Distribution of polarization vectors superposed on the contour images of the total intensity with same parameters as Fig.(a).

2.2 0248+430

图2(a)和(b)分别为叠加在辐射强度图上的偏振流量灰度分布图和偏振矢量分布图（1mas=8.448pc）。源射电结构主要由射电核心区域C、喷流B和节点A组成，呈现出典型的单侧核—喷流结构，喷流方向为150 °。射电辐射由C部分射电核主导，其辐射流量占总流量的80.4%，A和B部分各占10.9%和8.7%。本次得到的射电结构符合已有的结果[5, 17]，结构稳定。射电流量方面，Fomalont等[5]VLBA观测得到的总流量为1.4Jy，而本次测得1.12Jy，变化不大。A处射电节点可能是喷流与周围介质相互作用的结果，其介质环境可能比B处更复杂。

本研究首次得到了该源于4.6GHz观测频率的毫角秒尺度偏振结构。图2(a)显示偏振流量集

中在射电核靠近喷流的部分，偏振流量峰值为7.12mJy/beam（对应14σ，rms=0.51mJy/beam），偏振矢量1mas = 3.125mJy/beam，图2(b)显示其有较简单的偏振结构，偏振度达4%，偏振方向基本与喷流方向平行。利用IVS观测数据库[16]，参考该源1996年2.3GHz和8.3GHz的VLBA观测图像计算了谱指数分布，偏振区域的谱指数分布在-0.3—0.1范围内。该源总体的偏振度为3.87%(见表1)，而Rudnick等[12]利用VLA于1981年观测得到的偏振度为0.9%，本次结果高了近3%。本次结果显示喷流和节点没有明显的磁场和偏振，周围可能有浓密的介质，而有限的分辨率也会造成低偏振度的观测结果。

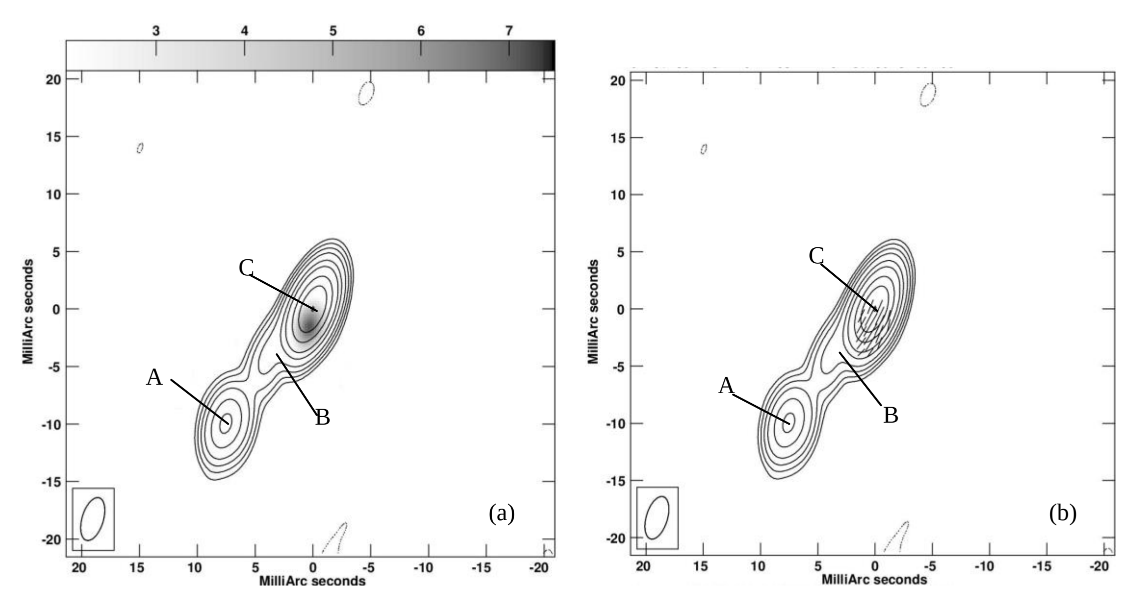


图 2 0248+430 (a)：叠加在辐射强度图上的偏振流量灰度分布图。波束为 3.8×1.8mas^2，位置角为-15.01°；辐射强度图峰值流量为 0.79Jy/beam，等强度线依次为峰值流量的-0.08%、0.25%、0.5%、1%、2%、5%、10%、25%、50%和 99%。灰度色标单位为 mJy/beam。(b): 叠加在辐射强度图上的偏振矢量分布图，参数与图(a)相同。A：节点，B：喷流，C：射电核。

Fig.2 0248+430 (a): Distribution of polarization flux density superposed on the contour images of the total intensity。The restoring beam is 3.8×1.8mas^2 in p.a。-15.01°; the peak flux density is 0.79Jy/beam, contours are plotted at -0.08%、0.25%、0.5%、1%、2%、5%、10%、25%、50%和 99% of the peak flux density. The unit of grey scale is mJy/beam. (b): Distribution of polarization vectors superposed on the contour images of total intensity with same parameters as Fig.(a). A: knot, B: jet, C: radio core.

3 结论与展望

通过对4.6GHz的VLBI偏振观测，对目标源0223+341和0248+430的射电结构和偏振性质进行了研究。源0223+341的射电结构主要由两个可能是热斑的部分组成，没有探测到射电核，射电辐射由其中一个热斑主导。源0248+430呈单侧核—喷流结构，射电核和喷流几乎成一条直线，但有较大尺度的节点，喷流的准直性与以往的观测结果相比有所提高。两个目标源的射电结构大体符合以往的观测结果，辐射总流量也与已有的结果相近，射电结构较稳定。

偏振方面，首次得到了源0223+341和0248+430的4.6GHz毫角秒尺度的偏振结构。源0223+341的偏振度为1.18%，偏振结构比较简单，集中在一个热斑处，观测得到较微弱的偏振辐射，周围介质可能比较浓密。源0248+430的偏振辐射集中在射电核附近，偏振流量变化较大。由于观测尺度光深和RM的限制，无法精确反推这两个源的内禀磁场结构，有待进行其他高频段的偏振观测，进一步研究分析。

源0223+341和0248+430的偏振度都比较低。O’Dea等[1-2]在收集了一系列CSS源和GPS源的偏振观测结果后指出在5GHz观测频段上这两类源的偏振度一般较低，且偏振度会随着观测频率的增大而增大，这表明低观测频段上产生低偏振度结果的原因可能是有限的分辨率或周围浓密介质产生的消偏振效应引起的。Dallacasa等[7]对一系列CSS源进行5GHz频率的偏振观测后也指

出其研究的大部分CSS源的偏振度较低。本次研究的低偏振度观测结果符合他们的结论。

单频观测能得到的信息有限，在进一步的工作中会给出多频的观测结果，得到基于本次观测数据的源谱指数分布和RM值分布，进一步探究这些射电源的物理性质以及与介质的相互作用情况。

致谢：此研究使用了美国甚长基线阵VLBA的观测数据，VLBA属于美国射电天文台（NRAO），由美国联合大学管理，由美国国家自然科学基金（NSF）资助。在数据处理过程中使用了软件包AIPS，由美国国立射电天文台提供。

参考文献：

[1] O'Dea C P. The compact steep-spectrum and gigahertz peaked-spectrum radio sources [J]. The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1998, 110(747): 493-532

[2] O'Dea C P, Saikia D J. Compact steep-spectrum and peaked-spectrum radio sources [J]. The Astronomy and Astrophysics Review, 2021, 29(1): 1-109

[3] 蒋栋荣, 曹新伍, 洪晓瑜. 活动星系核中的射电喷流[J]. 天文研究与技术, 2003, 0(S1): 91-97
JING D R, CAO X W, HONG X Y. Radio jet in AGNS[J]. Astronomical Research & Technology, 2003, 0(S1): 91-97

[4] 徐小林, 张皓晶, 易庭丰, 等. 耀变体在射电波段的偏振研究[J]. 天文研究与技术, 2019, 16(2): 131-138
XU X L, ZHANG H J, YI T F, et al. Polarization study of blazar in radio frequency band[J]. Astronomical Research & Technology, 2019, 16(2): 131-138

[5] Fomalont E B，Frey S，Paragi Z，et al. The VSOP 5 GHz continuum survey: the prelaunch VLBA observations [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2000, 131(1): 95-183

[6] Dallacasa D, Fanti C, Fanti R, et al. A sample of small size compact steep-spectrum radio sources I. VLBI at 18cm[J]. Astronomy and Astrophysics, 1995, 295: 27-42

[7] Dallacasa D, Orienti M, Fanti C, et al. A sample of small-sized compact steep-spectrum radio sources: VLBI images and VLA polarization at 5 GHz [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 433(1): 147-161

[8] Mantovani F, Rossetti A, Junor W, et al. Radio polarimetry of compact steep spectrum sources at sub-arcsecond resolution [J]. Astronomy and Astrophysics, 2013, 555: 1-13

[9] Patnaik A R, Garrett M A, Polatidis A, et al. A VLBA 15GHz small separation gravitational lens survey. // Kochanek C S, Hewitt J N. Astrophysical applications of gravitational lensing [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996: 405-406

[10] Xu W, Readhead A C S, Pearson T J, et al. The First Caltech--Jodrell Bank VLBI Survey. I. λ=18cm centimeter observations of 87 sources[J]. Astrophysical Journal Supplement, 1995, 98:1-32

[11] Pushkarev A B, Kovalev Y Y, Lister M L, et al. MOJAVE – XIV. Shapes and opening angles of AGN jets[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 468(4): 4992-5003

[12] Rudnick L, Jones T W. Rotation measures for compact variable radio sources [J]. The Astronomical Journal, 1983, 88: 518-526

[13] Condon J J, Cotton W D, Greisen E W, et al. The NRAO VLA sky survey [J]. The Astronomical Journal, 1998, 115(5): 1693-1716

[14] Napier P J, Bagri D S, Clark B G, et al. The Very Long Baseline Array[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(5): 658-672

[15] http://www.aips.nrao.edu/cook.html

[16] http://astrogeo.org/calib/search.html

[17] XU W, Readhead A C S, Pearson T J, et al. The First Caltech--Jodrell Bank VLBI Survey. III. VLBI and MERLIN Observations at 5 GHz and VLA Observations at 1.4 GHz [J]. Astrophysical Journal Supplement, 1995, 99: 297-348

VLBI Polarization Study of Compact radio Sources 0223+341 and 0248+430

LI Yuhang[1], ZHANG Haiyan[2, 3], CHEN Rurong[2, 3]
(1 College of Science，Tibet University，Lhasa 850000)
(2 National Astronomical Observatories，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100101)
（3 CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100101）

Abstract: Using the Very Long Baseline Array, we perform the polarization observations of the compact radio source 0223+341 and 0248+430 at 4.6GHz. We present their mas-resolution total intensity maps and, for the first time, their polarization maps. The compact steep spectrum source 0223 + 341 has no detectable radio core. Its jet structure mainly consists of two extended components, which may be explained as the hot spots in the kpc-scale radio lob. The polarization emission is firmly detected in a region near the northern component. Given that the polarization degree of 0223+341 is very low, there may be dense medium dense medium surrounding the jet components. The other sources 0248+430 is a GHz-peaked spectrum source and displays one-sided core-jet structure. Faint polarization emission is found near its jet base.

Key words: Polarization observations; Compact radio sources; Polarization structure

*基金项目：国家自然科学基金项目(U1831128和12041301)资助.
作者简介：李宇航，男，硕士，浙江衢州人，研究方向：致密陡谱源的VLBI观测研究。 Email: lyh@nao.cas.cn